Однофазные конденсаторные электродвигатели.

Многих радиолюбителей интересует вопрос включения трехфазных электродвигателей в однофазную сеть. В некоторых случаях трехфазные электродвигатели не разгоняются. Причиной этого являются провалы в кривой вращающих моментов, обусловленные высшими гармониками магнитного поля. В Институте электродинамики АН УССР проведено всестороннее исследование влияния высших гармоник на работу однофазных конденсаторных электродвигателей.

Все ли трехфазные электродвигатели могут быть включены в однофазную сеть?

В однофазную сеть практически могут быть включены любые трёхфазные электродвигатели. Но одни из них в однофазной сети работают плохо, например, двигатели с двойной клеткой короткозамкнутого ротора серии МА, а другие при правильном выборе схемы включения и параметров конденсаторов работают хорошо (асинхронные электродвигатели серий А, АО, АО2, Д, АОЛ, АПН, УАД). Мощность используемых электродвигателей ограничивается величиной допустимых токов сети. Авторами проведена опытная эксплуатация однофазных электродвигателей мощностью до 7,6 *кВт*.

Какие схемы включения целесообразно использовать?

В последние годы разработаны новые схемы однофазных конденсаторных электродвигателей с трехфазными обмотками (см. список литературы). В однофазных электродвигателях используется преобразование однофазного тока в многофазный. Для этой цели применяют фазосдвигающие элементы (конденсаторы, трансформаторы, дроссели, транзисторы и т. д.), параметры которых должны находиться в определенном соотношении с параметрами фаз электродвигателя. На практике обычно предпочтение отдается таким схемам включения, в которых в качестве фазосдвигающих элементов применяются конденсаторы.

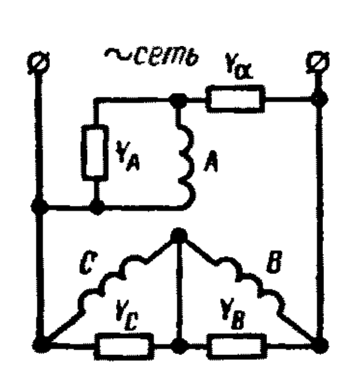


Рис. 1. Схема последовательно – параллельного соединения обмоток статора.

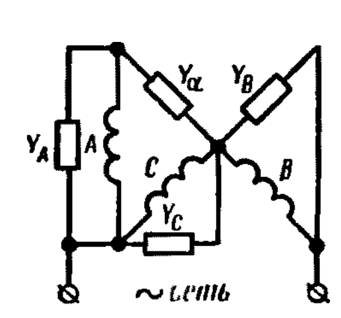


Рис. 2. Схема соединения обмоток статора в не симметричную звезду.

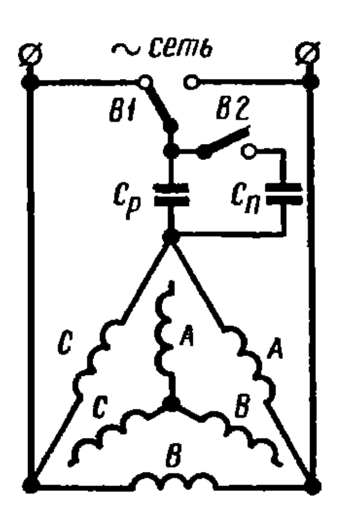


Рис. 3. Схема соединения обмоток статора в треугольник или звезду.

Одними из лучших схем однофазных электродвигателей являются схемы с последовательно–параллельным соединением обмоток статора (рис. 1) и соединением обмоток статора в несимметричную звезду (рис. 2). Номинальное напряжение сети для этих схем в $\sqrt{3}$ раз больше номинального фазного напряжения обмоток статора. Например, для однофазных сетей 220 B требуются электродвигатели с фазным напряжением 127 B. Однофазные электродвигатели, выполненные по этим схемам, отличаются высокими энергетическими показателями, отсутствием провалов в кривой вращающих моментов, минимальным электромагнитным шумом. На схемах указано по четыре фазосдвигающих элемента, хотя часто можно ограничиться использованием только двух Yв и Ya.
Недостатком схемы с последовательно–параллельным соединением обмоток статора является использование фазосдвигающих элементов двух различных номинальных напряжений $Ua \approx \sqrt{3} \times U$в. Этот недостаток отсутствует при соединении обмоток в несимметричную звезду.

Выбор параметров фазосдвигающих конденсаторов можно произвести по паспортным данным электродвигателя (емкость конденсаторов получается в микрофарадах).
Для схемы с последовательно–параллельным соединением обмоток:

$$C_A = C_C = \frac{I\text{нф}}{U\text{нф}} \times \frac{10^6}{2 \times \pi \times f} \times \left(sin\varphi\text{н} - \frac{1}{\sqrt{3}} \times cos\varphi\text{н}\right)$$

$$C_B = \frac{I\text{нф}}{U\text{нф}} \times \frac{10^6}{2 \times \pi \times f} \times \left(sin\varphi\text{н} + \frac{1}{\sqrt{3}} \times cos\varphi\text{н}\right)$$

$$C_\alpha = \frac{I\text{нф}}{U\text{нф}} \times \frac{10^6}{2 \times \pi \times f} \times \frac{cos\varphi\text{н}}{\sqrt{3}}$$

Для схемы соединения обмоток в несимметричную звезду:

$$C_A = C_C = \frac{I\text{нф}}{U\text{нф}} \times \frac{10^6}{2 \times \pi \times f} \times \left(sin\varphi\text{н} - \frac{1}{\sqrt{3}} \times cos\varphi\text{н}\right)$$

$$C_B = \frac{I\text{нф}}{U\text{нф}} \times \frac{10^6}{2 \times \pi \times f} \times \left(sin\varphi\text{н} + \sqrt{3} \times cos\varphi\text{н}\right)$$

$$C_\alpha = \frac{I\text{нф}}{U\text{нф}} \times \frac{10^6}{2 \times \pi \times f} \times \frac{2 \times cos\varphi\text{н}}{\sqrt{3}}$$

При достаточно высоких коэффициентах мощности фазы (что характерно для двухполюсных электродвигателей *nc* = 3000 *об. мин.*) удовлетворительные характеристики могут быть получены при использовании всего двух конденсаторов C_B и Ca. Четырехполюсные электродвигатели (*nc* = 1500 *об. мин.*) имеют более низкие коэффициенты мощности фазы. Чтобы получить круговое вращающееся поле, в таких двигателях необходимо устанавливать все четыре фазосдвигающих элемента. Для реверса электродвигателя нужно поменять местами фазы В и С.
Можно использовать соединение трехфазных обмоток статора в правильный треугольник, когда *Uф = Uс,* или в звезду, когда *Uф = Uл*$/\sqrt{3}$ (рис. 3).
Эти схемы для обеспечения кругового поля требуют в общем случае установки двух фазосдвигающих элементов. Выбор параметров фазосдвигающих элементов также можно произвести по паспортным данным электродвигателя.

Расчеты упрощаются, если воспользоваться отношением реактивной мощности конденсаторов и дросселей к потребляемой мощности электродвигателя $P_1 = P_2/\eta$:

$$P\text{к} = \omega \times Cp \times U^2 \times 10^6 = P_1 \times \left(\frac{1}{\sqrt{3}} + \frac{tg\varphi\text{н}}{3}\right)$$

$$P\text{др} = U \times I\text{др} = \frac{U^2}{X\text{др}} = P_1 \times \left(\frac{1}{\sqrt{3}} - \frac{tg\varphi\text{н}}{3}\right)$$

При $cos\varphi$н близком к 0,5, реактивная мощность дросселя мала, поэтому можно устанавливать только один фазосдвигающий элемент – конденсатор. Его емкость будет равна (в микрофарадах):

$$C\text{р} = \frac{P\text{к} \times 10^6}{\omega \times U_\text{К}^2}$$

где Pк выражена в вольт–амперах, $\omega = 2 \times \pi \times f = 314$ (для 50 *гц*).
В режиме кругового поля все отмеченные схемы обеспечивают полное использование мощности трехфазного электродвигателя. Подбирая параметры конденсаторов и дросселей, электродвигатели можно перевести в режим кругового поля при любой скорости и нагрузке. Этот режим соответствует также минимальным шумам и вибрациям.

Способы пуска однофазных электродвигателей.

Часто в литературе рекомендуют пуск однофазного электродвигателя производить с помощью "пусковой веревочки". Для однофазных конденсаторных электродвигателей такой метод пуска не рекомендуется, так как электродвигатель можно вывести в режим работы против бо̀льшего (при неподвижном роторе) поля. С рабочими конденсаторами электродвигатель развивает небольшой пусковой момент:

$$\frac{M\text{пуск}}{M\text{ном}} \approx 0{,}2 \div 0{,}3$$

В последние годы получили развитие комбинированные способы пуска. Идея этого метода заключается в применении двух схем включения обмоток однофазных электродвигателей: во время пуска используется последовательно – параллельное соединение обмоток статора, а после разгона электродвигателя производится их переключение в несимметричную звезду (рис. 4). Выбор параметров фазосдвигающих элементов осуществляется из условия длительного режима рабочей схемы.
В таблице приведены емкости установленных конденсаторов, а также основные показатели однофазных микроэлектродвигателей серии УАД и электродвигателей малой мощности серии АОЛ и 4А, включенных по схеме рис. 4, при питании от однофазной сети напряжением 220 *В* (номинальное напряжение конденсаторов типа МБГЧ – 150 *В*). На рис. 5 приведена комбинированная схема пуска электродвигателя, работающего при использовании схемы треугольник.
Для получения повышенного пускового момента две обмотки включаются параллельно, а третья – последовательно с конденсатором. В рабочем режиме конденсатор шунтирует одну из трех фаз обмотки, соединенных по схеме треугольник. Хотелось бы обратить внимание на то, что переход с пусковой схемы на рабочую осуществляется при помощи простого переключателя с нормально открытым и нормально закрытым контактами.

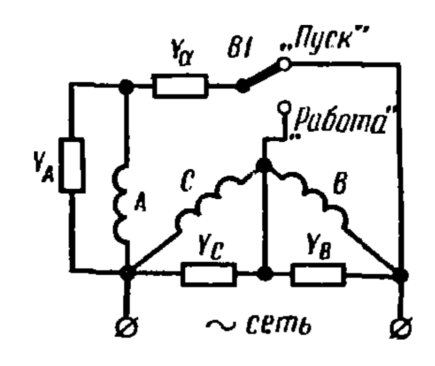


Рис. 4. Комбинированный способ пуска электродвигателя.

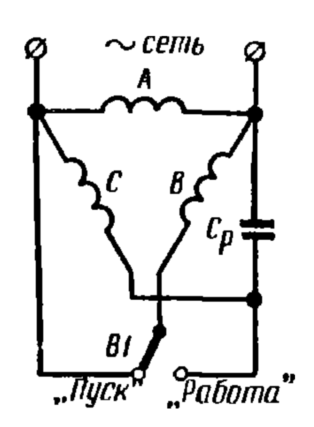


Рис. 5. Комбинированный способ пуска электродвигателя при соединении обмоток статора в треугольник.

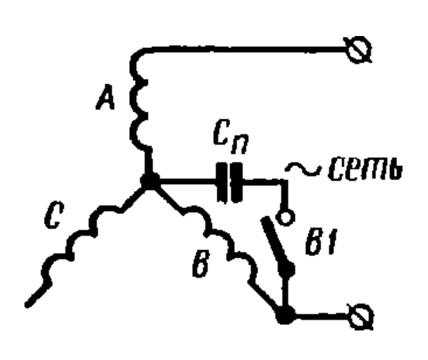


Рис. 6. Схема однофазного электродвигателя полученного из трехфазного.

Тип двигателя	*рабочая схема*								*пусковая схема*		
	P, Вт	*I, A*	*C_A, мкФ*	*C_B мкФ*	*C_C мкФ*	*Cα мкФ*	*$M_{макс}/M_{ном}$*	*$M_{пуск}/M_{ном}$*	*$I_{пуск}/I_{сети}$*	*$M_{макс}/M_{ном}$*	*$M_{пуск}/M_{ном}$*
УАД–12	1,5	0,042	0,4	1,6	0,4	0,6	2,2	1,6	1,9	2,65	2,6
УАД–22	4	0,061	0,6	2,4	0,6	0,9	2,0	0,8	2,1	2,3	15
УАД–32	7	0,098	1,2	4	1,2	1,4	2,0	0,8	2,5	2,3	1,6
УАД–42	13	0,13	1,0	4,8	1,0	1,9	1,9	0,7	2,5	2,2	1,3
УАД–52	20	0,20	1,6	7,4	1,6	2,9	1,7	0,6	2,6	2,1	1,5
УАД–62	40	0,33	1,4	11	1,4	4,8	1,6	0,5	2,65	1,8	1,2
УАД–72	70	0,51	1,8	16,6	1,8	7,4	1,5	0,4	3,0	1,7	0,8
УАД–24	1,2	0,06	0,3	2,1	0,3	0,9	2,1	1,9	1,7	2,85	2,4
УАД–34	2,5	0,10	0,8	3,6	0,8	1,4	1,8	1,4	1,8	2,8	2,4
УАД–44	6	0,12	1,3	4,9	1,3	1,8	1,9	1,6	2,0	2,7	2,7
УАД–54	9	0,18	1,9	7,1	1,9	2,6	1,8	1,5	2,0	2,6	2,4
УАД–64	20	0,23	2,5	9,1	2,5	3,3	1,8	0,7	2,3	2,6	1,4
УАД–74	30	0,37	4,0	14,8	4,0	5,4	1,9	0,7	2,3	2,5	1,5
АОЛ–011–2	110	0,72	0,6	21,4	0,6	10,4	1,6	0,33	2,44	2,1	0,76
АОЛ–012–2	120	0,98	0,8	28,6	0,8	13,9	1,55	0,37	2,4	2,0	0,63
АОЛ–11–2	180	1,48	0,3	44,1	0,3	21,9	1,5	0,38	2,7	1,95	0,74
АОЛ–12–2	270	2,06	0,4	60,7	0,4	30	1,45	0,38	2,7	1,9	0,73
АОЛ–21–2	400	2,89	1,6	84,6	1,6	41,5	1,40	0,37	2,64	1,8	0,72
АОЛ–22–2	600	4,22	2,3	122	2,3	61,3	1,35	0,38	2,7	1,8	0,72
АОЛ–011–4	50	0,61	5,3	22,7	5,3	8,7	1,55	0,38	2,37	1,95	0,79
АОЛ–012–4	80	0,77	5,6	27,6	5,6	11	1,5	0,4	2,3	1,9	0,89
АОЛ–11–4	120	1,12	5,4	37,8	5,4	16,2	1,45	0,36	2,43	1,9	0,78
АОЛ–12–4	180	1,54	6,4	50,2	6,4	21,9	1,4	0,27	2,36	1,85	0,6
АОЛ–21–4	270	2,14	8,7	71,1	8,7	31,2	1,35	0,37	2,27	1,8	0,81
АОЛ–22–4	400	2,24	10,4	98,4	10,4	44	1,3	0,38	2,24	1,7	0,82
4АТ–71А2	750	5,17	–	150	–	74	1,42	0,27	2,92	1,96	0,6
4АТ–71В2	1100	7,4	–	200	–	100	1,32	0,26	2,71	1,94	0,59
4АТ–71А4	550	4,29	24	140	24	60	1,48	0,44	2,6	2,07	0,87
4АТ–71В4	750	5,32	30	180	30	80	1,44	0,41	2,82	2,03	0,83

Примечание. Номинальное фазовое напряжение двигателя 127 *В*.

Наиболее распространенным является однофазный электродвигатель, полученный из трехфазного при обрыве одного из проводов трехфазной сети. Характеристики его рабочего режима аналогичны характеристикам электродвигателя с одной обмоткой на статоре, занимающей ⅔ всего числа пазов. Пусковой момент такого электродвигателя равен нулю. Между тем запуск электродвигателя легко осуществляется, если воспользоваться схемой рис. 6. Одна из фаз электродвигателя шунтируется пусковым конденсатором, емкость которого выбирается из условия создания требуемого пускового момента. Например, если нужно получить кратность пускового момента на уровне 1 – 1,2, то можно воспользоваться такой рекомендацией относительно емкости пускового конденсатора: реактивная мощность пускового конденсатора должна быть примерно в 3 раза больше номинальной мощности включаемого трехфазного электродвигателя.

Номинальное напряжение пускового конденсатора меньше напряжения однофазной сети. Так, при напряжении сети 127 *В* номинальное напряжение конденсатора – 80 *В*, а при напряжении сети 220 *В* – 150 *В*.

Емкость пускового конденсатора (в микрофарадах) равна:

$$C\text{п} = \frac{P\text{к} \times 10^6}{\omega \times U_\text{К}^2}$$

Например, для включения трехфазного электродвигателя мощностью 1 *кВт* в сеть напряжением 220 *В* (реактивная мощность $P_К$ = 3000 *ВА*, $U_К$ = 150 *В*, $\omega = 2 \times \pi \times f = 314$ (f – частота напряжения, π - число "пи") необходим конденсатор емкостью 425 *мкФ*.

После разгона электродвигателя пусковой конденсатор отключается. В однофазном режиме такой электродвигатель сможет развивать мощность 500–600 *Вт*. Для улучшения рабочих характеристик можно зашунтировать одну из обмоток рабочим конденсатором, емкость которого выбирают из условия минимума шума, вибраций и нагрева обмоток.

Значительный интерес для радиолюбителей могут представить схемы включения в однофазную сеть трехфазных электродвигателей, изображенные на рис. 7.

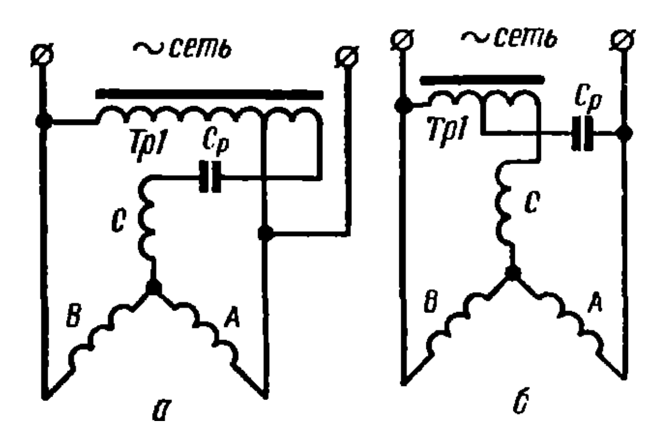


Рис. 7. Схема включения трехфазного электродвигателя в однофазную сеть:
а – с использованием автотрансформатора; *б* – конденсатора.

Напряжение на выходе автотрансформатора *(Uавт = KU, U* – напряжение сети) и емкость конденсатора (в микрофарадах) подбираются так, чтобы обеспечить круговое вращающееся поле при какой–либо выбранной нагрузке электродвигателя. Можно воспользоваться следующими формулами.

Для рис. 7, *а:*

$$K = \frac{1}{2} + \frac{\sqrt{3}}{2} \times ctg\varphi \quad \text{С}p = 3680 \times \frac{I}{U} sin\varphi$$

Для рис. 7, *б:*

$$K = \frac{1}{2} - \frac{\sqrt{3}}{2} \times tg(30° - \varphi) \quad Cp = 3680 \times \frac{I}{K \times U} \times cos(30° - \varphi)$$

При напряжении сети 220 *В* напряжение на конденсаторе не превышает 400 *В* (рис. 7, *а)* и 220 *В* (рис. 7, *б*). При включении электродвигателя по схеме, изображенной на рис. 7, *б,* в режиме холостого хода может возникнуть феррорезонанс, что вызовет перенапряжения на элементах. Для защиты от этого можно использовать обычный плавкий предохранитель. При пуске электродвигателя параллельно рабочему подключается пусковой конденсатор, емкость которого в 2 – 4 раза больше емкости рабочего конденсатора.

Какие типы конденсаторов можно использовать в качестве рабочих и пусковых?

В качестве рабочих конденсаторов чаще всего используют металлобумажные конденсаторы типа МБГО, МБГП, МБГЧ; можно использовать также конденсаторы типа МБГ–МН, но при этом значительно возрастет объем конденсаторной батареи, так как указанные конденсаторы имеют большой удельный вес на единицу реактивной мощности. Для всех этих конденсаторов, кроме МБГЧ, номинальное напряжение указано для постоянного тока. Надежная работа конденсаторов постоянного тока в конденсаторных электродвигателях достигается при выборе двух–, трехкратного запаса по напряжению. Только конденсаторы МБГЧ рассчитаны на работу в цепях переменного тока, поэтому они выбираются из каталога на напряжение, ближайшее к большему по отношению к номинальному напряжению фазы.
В качестве пусковых конденсаторов целесообразно применять электролитические конденсаторы переменного тока типа К50–19. Можно применять электролитические конденсаторы типа КЭ–2Н, К50–3 соответствующей емкости и с запасом по номинальному напряжению не менее 3.
Пуск двигателя и отключение пускового конденсатора можно производить с помощью кнопки ПНВС, причем кнопку *«Пуск»* необходимо держать нажатой до полного разгона электродвигателя (при пуске под нагрузкой обычно 3–4 сек.), после отпускания кнопки пусковой конденсатор отключается.
Необходимо учитывать, что при работе электродвигателя в режиме холостого хода по конденсаторной обмотке протекает ток па 30 – 40% больше номинального, что ведет к нежелательному перегреву электродвигателя, поэтому такой режим допустим только на небольшой промежуток времени.

Подробные сведения по исследованию работы трехфазного электродвигателя при питании от однофазной сети изложены в следующей литературе:

Адаменко А. И. Однофазные конденсаторные двигатели. Киев, изд–во АН УССР, 1960.
Адаменко А. И. Несимметричные асинхронные машины. Киев, изд–во АН УССР, 1962.
Адаменко А. И. Методы исследования несимметричных асинхронных машин.
Киев, «Наукова думка», 1969.
Адаменко А. И., Кисленко В. И. Преобразователи однофазного тока в многофазный.
Киев, «Техника», 1971.

Составлено по публикации в журнале «В помощь радиолюбителю», выпуск №49, 1975 г.
авторы: А. Адаменко, В. Кисленко, В. Оноприч, В. Шуруб.